

6 Dichtedynamik

Zeitreihen zur C-Dynamik weisen im Allgemeinen eine hohe Variabilität auf. Da der Kohlenstoffumsatz in engem Bezug zu bodenphysikalischen Parametern steht, wurden im Verlauf eines Anbaujahres die räumliche Heterogenität und die dynamische Veränderung der Trockenrohddichte (TRD) in dem Ap-Horizont der Volldüngungsvariante des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt untersucht. Am ersten Messtermin erfolgte die Bestimmung der TRD mit der konventionellen Stechzylindermethode zeitgleich zur Aufnahme eines Höhenprofils mittels Scanneraufnahmen (s. Kap 3.3.1), um die punktuelle TRD Messung im weiteren Versuchszeitraum räumlich auflösen zu können. An den folgenden Messterminen dienten die Scannermessungen zur Ermittlung von Höhendifferenzen, aus denen sich eine veränderte TRD ableiten lässt, die flächenhaft dargestellt werden kann. Die aus Höhendifferenzen (HD) bestimmte TRD wird im folgendem als TRD_{HD} bezeichnet. Die Verteilung der mittleren TRD_{HD} im Bodenprofil erfolgt über Eindringwiderstandsmessungen (s. Kap. 3.3.3), um neben der Heterogenität auf dem Feld die Variabilität der TRD im Bodenprofil abbilden zu können. Zur Überprüfung der TRD_{HD} wurde die TRD parallel an allen Messterminen konventionell mit Stechzylindern (s. Kap.3.3.2) in drei Tiefenstufen bestimmt und daraus ein Mittelwert gebildet. Die mit Stechzylindern (StZ) bestimmte TRD wird als TRD_{StZ} bezeichnet.

Das CIPS-Modell wurde dazu benutzt, um die Auswirkung extremer Änderungen der TRD_{HD} auf die Kohlenstoffspeicherung im Boden abzuschätzen.

6.1 Dichtebestimmung mittels Stechzylindern

Da sich die Dichte am ersten Messtermin noch nicht aus Höhendifferenzen bestimmen ließ, wurde diese mit Stechzylindern (s. Kap. 3.3.2) gemessen. An den folgenden Messterminen erfolgte die Bestimmung TRD_{StZ} parallel zur Bestimmung der TRD_{HD} , um die Dichtebestimmung aus Höhendifferenzen auf Plausibilität überprüfen zu können. Um den Dichteverlauf im Profil des A_p -Horizontes ausreichend abzubilden, wurden die Stechzylinder in drei Tiefenstufen entnommen.

In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse der TRD_{StZ} aller Messtermine und Entnahmetiefen zusammengestellt und im Anhang G in Abb.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Die Messergebnisse der Trockenrohdichte mit Stechzylindern (TRD_{StZ})

Schicht [cm]	Mittlere	TRD_{StZ}	TRD_{StZ}	TRD_{StZ}	TRD_{StZ}	TRD_{StZ}
	Entnahme- tiefe [cm]	24.09.2002 [g/cm ³]	21.11.2002 [g/cm ³]	06.03.2003 [g/cm ³]	20.05.2003 [g/cm ³]	01.10.2003 [g/cm ³]
0-10	5	1,35	1,28	1,25	1,51	1,48
10-20	15	1,44	1,35	1,40	1,53	1,52
20-30	25	1,50	1,36	1,45	1,57	1,53

Am ersten Messtermin am 24.09.2002 wurden im Bezug zu den anderen Messterminen mittlere Werte der TRD_{StZ} gemessen. Die geringen TRD_{StZ} -Werte am zweiten Messtermin am 21.11.2002 sind auf die Auflockerung des Bodens durch das Pflügen am 26.10.2002 zurückzuführen. Dabei lässt sich an den Messwerten ablesen, dass in den unteren Bodenschichten des Pflughorizontes bereits ein Absetzungsprozess des Bodens eingesetzt hat. Die weitere Verdichtung des Bodens erfolgte im Verlauf der Winterperiode bis zum dritten Messtermin am 06.03.2003. Neben der Verdichtung des Bodens erfolgte im oberen Bereich eine Auflockerung durch Kryoturbation. Am vierten Messtermin am 20.05.2003 wurden die höchsten TRD_{StZ} gemessen. Diese ist auf die Bearbeitung des Ackerbodens mit Walzen zurückzuführen. Am fünften Messtermin am 06.10.2003 war der Boden gegenüber dem 20.05.2003 aufgrund von Bioturbation gelockert.

Zum Vergleich der Dichtebestimmungsmethode über Höhendifferenzen mit der konventionellen Stechzylindermethode muss die TRD_{StZ} über das Tiefenprofil gemittelt werden. Dazu wurde sowohl a) ein linearer Ansatz als auch b) ein exponentieller Ansatz geprüft. Der Vorteil des linearen Ansatzes besteht bezüglich der Parameteranzahl. Bei zwei Parametern und drei Messwerten existiert ein Freiheitsgrad für die Fehlerkorrektur der Messwerte. Der Nachteil ist im unrealistischen Kurvenverlauf der linearen Regression begründet. Beim exponentiellen Ansatz lassen drei Parameter und drei Messwerte keine Freiheitsgrade für eine Fehlerkorrektur zu. Die exponentielle Regression liefert aber einen realistischen Kurvenverlauf. In der Abb. 1 im Anhang G sind die gemessenen TRD_{StZ} zusammen mit den linearen und exponentiellen Regressionen abgebildet.

a) Die lineare Regression liefert die Gleichung (6.1) in Abhängigkeit der Tiefe x . Dabei läuft x von 0 bis zur Endtiefe $h = 30$ cm, die der festgelegten Schichtdicke zu Versuchsbeginn entspricht.

$$\overline{TRD}_{StZ}(x) = p_1 x + p_2 \quad (6.1)$$

Gesucht ist die in der Schicht 0 bis 30 cm vorherrschende mittlere Dichte (\overline{TRD}_{StZ}), die sich aus Gleichung (6.2) ergibt.

$$\overline{TRD}_{StZ} = \overline{TRD}_{StZ}\left(\frac{h}{2}\right) = \overline{TRD}_{StZ}(15) \quad (6.2)$$

Die für die verschiedenen Messtermine ermittelten Koeffizienten p_1 und p_2 sind in Tabelle 6.2 aufgeführt, mit denen die mittlere \overline{TRD}_{StZ} berechnet wurde.

Tabelle 6.2: Mittlere \overline{TRD}_{StZ} berechnet mit linearem Ansatz nach Gleichung (6.1) mit den Koeffizienten p_1 und p_2

Termin	Koeffizienten		\overline{TRD}_{StZ} 0-30cm [g/cm ³]
	p_1	p_2	
24.09.2002	0,0075	1,3175	1,43
22.11.2002	0,004	1,27	1,33
06.03.2003	0,01	1,21667	1,37
20.05.2003	0,003	1,49167	1,54
01.10.2003	0,0025	1,4725	1,51

b) Die exponentiale Regression erster Ordnung liefert die Dichtefunktion (6.3) in Abhängigkeit der Tiefe x . Dabei läuft x von 0 bis zur Endtiefe $h = 30$ cm, die der festgelegten Schichtdicke zu Versuchsbeginn entspricht.

$$\overline{TRD}_{StZ}(x) = c - a \cdot e^{-bx} \quad (6.3)$$

Durch Integration der Gleichung (6.3) geteilt durch die Schichtdicke (h) ergibt sich die Gleichung (6.4), mit der sich durch Einsetzen der Koeffizienten a , b und c die mittlere TRD_{StZ} ermitteln lässt.

$$\overline{TRD}_{StZ}(h) = \frac{\int_0^h TRD_{StZ}(x) dx}{h} = \frac{\int_0^h (c - a \cdot e^{bx}) dx}{h} = \frac{\left[cx - \frac{a}{b} \cdot e^{bx} \right]_0^h}{h}$$

$$\overline{TRD}_{StZ}(h) = c + \frac{a}{b \cdot h} (1 - e^{bh}) \quad (6.4)$$

In Tabelle 6.3 sind die bei der exponentialen Regression ermittelten Koeffizienten und die mit der Gleichung (6.4) berechneten mittleren TRD_{StZ} mit $h = 30$ cm von allen Messterminen zusammengestellt.

Tabelle 6.3: Mittlere TRD_{StZ} berechnet mit exponentialem Ansatz nach Gleichung (6.4) mit den Koeffizienten a , b und c

Termin	Koeffizienten			\overline{TRD}_{StZ} 0-30cm
	a	b	c	[g/cm ³]
24.09.2002	1,62	0,33068	-0,04054652	1,43
22.11.2002	1,36167	0,21807	-0,19459114	1,32
06.03.2003	1,475	0,38971	-0,10986126	1,36
20.05.2003	1,54497	0,05472	-0,083925	1,52
01.10.2003	1,53333	0,10667	-0,13862934	1,51

Die mit dem linearen bzw. exponentialen Ansatz berechneten TRD_{StZ} , bei denen über das Tiefenprofil Mittelwerte gebildet wurden, können im folgenden Kapitel den über die Fläche gemittelten TRD_{HD} gegenübergestellt werden.

Gleichzeitig kann aus der mittleren TRD_{StZ} von einem Messtermin eine im Bezug zur festgelegten Referenzschichtdicke (h_1) veränderten Schichtdicke (h) berechnet werden und mit den mittleren Höhendifferenzen aus den Scannermessungen verglichen werden. Die Schichtdicken lassen sich für die verschiedenen Messtermine nach Gleichung (6.5) mit den mittleren TRD_{StZ} berechnen.

$$h = \frac{h_1 \cdot TRD_1}{\overline{TRD}_{StZ}} \quad (6.5)$$

mit

h_1 festgelegte Schichtdicke bei Versuchsbeginn

TRD_1 Trockenrohddichte zu Versuchsbeginn

\overline{TRD}_{StZ} Mittlere Trockenrohddichte am betrachteten Termin

In Tabelle 6.4 sind die ermittelten Schichtdicken für die mittleren \overline{TRD}_{StZ} aus Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3 zusammengestellt. Diese können im folgenden Kapitel den Schichtdicken, die sich aus der mittleren Höhendifferenz aus den Scannermessungen ergeben, gegenübergestellt werden.

Tabelle 6.4: Die aus der Änderung der \overline{TRD}_{StZ} (s. Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3) ermittelten Schichtdicken

Termin	Schichtdicke [mm] (Lineare Regression)	TRD [g/cm ³] (Lineare Regression)	Schichtdicke [mm] (Exponentiale Regression)	TRD [g/cm ³] (Exponentiale Regression)
24.09.2002	300*	1,43	300*	1,43
22.11.2002	323	1,33	325	1,32
06.03.2003	313	1,37	315	1,36
20.05.2003	279	1,54	282	1,52
01.10.2003	284	1,51	284	1,51

* festgelegte Referenzschichtdicke

6.2 Dichtebestimmung aus Höhendifferenzen und deren Verteilung im A_p -Horizont

Bei der Dichtebestimmung mittels Scanneraufnahmen (s. Kap. 3.3.1) erfolgt die Bestimmung der Dichte unter der Annahme, dass Änderungen der Dichte in erster Näherung einem Anheben oder Absenken der Bodenoberfläche entsprechen. In Abb. 6.1 ist die Methode zur Bestimmung der TRD_{HD} dargestellt. Ausgehend von einem Höhenprofil zu Versuchsbeginn und einer bekannten mittleren \overline{TRD}_{StZ} , die mittels Stechzylinderproben für den A_p -Horizont ermittelt wurde, erfolgt die Bestimmung der TRD zu späteren Zeitpunkten aus Höhendifferenzen. Da die Höhendifferenz für beliebige Teilflächen bestimmt werden kann, erhält man eine flächenhafte Verteilung der TRD_{HD} . Durch Mittelwertbildung über alle

TRD_{HD} der Teilflächen ergibt sich für den A_p -Horizont eine mittlere TRD_{HD} . Eine mögliche Verteilung der mittleren TRD_{HD} im A_p -Horizont kann mittels Eindringwiderstandsmessungen (s. Kap. 3.3.3) vorgenommen werden, unter der Voraussetzung, dass die TRD von 0-5cm bekannt ist bzw. aus Stechzylinderproben ermittelt wurde.

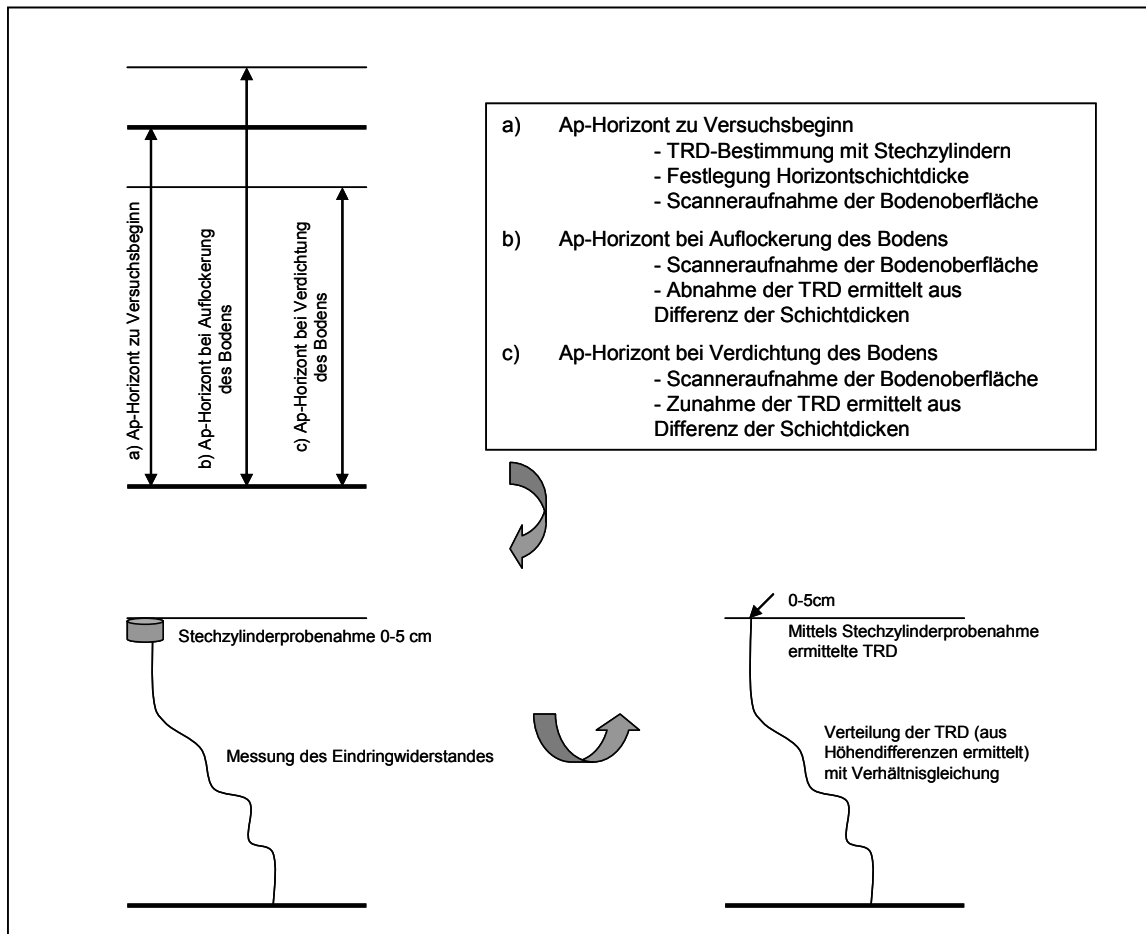


Abb. 6.1: Methode zur Bestimmung der TRD_{HD} und Verteilung im Bodenprofil mittels Eindringwiderstandsmessungen

6.2.1 Dichtebestimmung aus Höhendifferenzen

Aus den Scannermessungen (s. Kap. 3.3.1) wurden mit dem Programm Surfer© Höhenprofile erstellt, die im Anhang H in den Abb. 1 bis Abb. 5 dargestellt sind. Die Höhenprofile dienen zur Visualisierung der dynamischen Veränderung der Bodenoberfläche. Die Verschiebung der am häufigsten vorkommenden Höhenklassen zwischen den fünf Terminen ist am Farbwechsel und damit der Höhenklassenwechsel deutlich erkennbar. Die Dynamik der Bodenoberfläche, welche durch die veränderte TRD gesteuert wird, entspricht der in Kap. 6.1 dargestellten Dynamik der TRD_{StZ} . Der erste Messtermin am 24.09.2002 lag nach dem Erntetermin von

Weizen und vor dem Pflugtermin. Zu diesem Zeitpunkt war der Boden aufgrund der Setzung und Auflast von Landmaschinen stark verdichtet. Der ermittelte relative Abstand zur oberhalb der Bodenoberfläche liegenden Betonfläche, die als Bezugsfläche mit der Höhe $h = 0$ mm diente, war groß. Die Abb. 1 in dem Anhang H zeigt dies durch vorherrschende Grün- und Gelbtöne, welche den niederen bis mittleren Höhenklassen entsprechen. Am 26.10.2002 wurde der Boden gepflügt. Der zweite Messtermin wurde am 21.11.2003 durchgeführt. Durch die Lockerung des Bodens beim Pflügen wurde die Bodenoberfläche relativ zum ersten Messtermin angehoben. Der gemessene Abstand zur Betonfläche verringerte sich, was in der Abb. 2 im Anhang H an der überwiegenden Gelb- bis Braunfärbung zu erkennen ist. Nach der Winterperiode wurde am 06.03.2003 der dritte Messtermin durchgeführt. Durch das Absetzen des Bodenkörpers vergrößerte sich der Abstand der Bodenoberfläche im Bezug zur Betonfläche wieder. Aber es wurde nicht der Abstand vom Messtermin am 24.09.2002 erreicht. In Abb. 3 in dem Anhang H ist die Absetzung des Bodenkörpers, an der verstärkten Gelb- und Grünfärbung zu erkennen. Vor der Aussaat der Zuckerrüben wurde das Saatbett gewalzt. Der vierte Messtermin wurde am Beginn der Wachstumsperiode der Zuckerrüben durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Pflanzhöhe ca. 10 cm. Für die spätere numerische Auswertung wurden die Pflanzenreihen herausgelöscht, die auf der Abb. 4 im Anhang H deutlich als Erhebung zu erkennen sind. Insgesamt ist der Boden zu diesem Zeitpunkt stark verdichtet, was an der Grünfärbung in Abb. 4 in dem Anhang H zu erkennen ist. Der Zeitpunkt des fünften Messtermins lag kurz vor der Ernte der Zuckerrüben. Die geköpften Zuckerrüben ragten ca. 5 cm aus dem Boden. Für die numerische Auswertung der Daten wurden diese Reihen ebenfalls gelöscht. In der Abb. 5 im Anhang H ist ersichtlich, dass der Boden immer noch stark verdichtet ist, aber die Bodendecke gegenüber dem vierten Messtermin angehoben wurde. Dies lässt sich auf das Wurzelwachstum der Zuckerrübe und deren Bioturbation zurückführen. Um die Höhendifferenzen zwischen den Messterminen differenziert zu ermitteln, wurde die Fläche in ein Raster mit einer Rastergröße von 10 x 10 cm aufgeteilt. So konnten die nicht deckungsgleichen xy-Koordinaten in einem Rasterquadrat durch Mittelwertbildung der Höhe zusammengefasst und rasterweise Höhendifferenzen zwischen den Messterminen berechnet werden. In einem Rasterquadrat sind jeweils ca. 10 Messpunkte zusammengefasst. Die Größe des Rasters von 10x10 cm wurde gewählt, damit die Bodenoberfläche zwischen den Pflanzenreihen in den Abbildungen sichtbar gemacht werden konnte.

Die Rasterkarten der relativen Höhe, die den Abstand zur Bezugsfläche darstellen, sind im Anhang I in den Abb. 1 bis 5 zusammengestellt. Für die Rasterkarten sind ebenfalls die

Aussagen zutreffend, welche zu den Höhenprofilen im Anhang H für die Abb. 1 bis 5 getroffen wurden (s.o.). Da in den Rasterkarten für die Messtermine mit Bewuchs die Reihen mit Pflanzenbestand gelöscht wurden, ist hier deutlicher die Anhebung der Bodenoberfläche am 06.10.2003 (s. Anhang I Abb. 5) gegenüber dem Messtermin am 20.05.2003 (s. Anhang I Abb. 4) zu erkennen.

Ausgehend von der rasterweisen relativen Höhe aller Termine wurden die Differenzen zur Bodenoberfläche zu Versuchsbeginn am 24.09.2002 gebildet, die in dem Anhang I Abb. 6 bis 9 dargestellt sind. Dabei treten an einem Messtermin sowohl negative als auch positive Höhenänderungen auf, da neben der horizontalen Bewegung vertikale Bodenverlagerungen z.B. aufgrund der Pflugscharte stattfinden. Im Durchschnitt überwiegen jedoch bei Verdichtung des Bodens gegenüber dem Messtermin zu Versuchsbeginn negative Werte, wie bei den Messterminen am 20.05.2003 (s. Anhang I Abb. 8) und am 06.10.2003 (s. Anhang I Abb. 9). Bei Auflockerung des Bodens dominieren positive Höhendifferenzen, die an den Messterminen am 21.11.2002 (s. Anhang I Abb. 6) und 06.03.2003 (s. Anhang I Abb. 7) ermittelt wurden. Die maximal auftretenden Höhendifferenzen an den einzelnen Messterminen sind in Tabelle 6.5 zusammengestellt. Aus dieser Tabelle ist zu entnehmen, dass einzelne Rasterflächen während des Versuchszeitraumes maximal 14 cm gehoben bzw. 11 cm gesenkt wurden.

Tabelle 6.5: Maximal auftretende Höhendifferenzen (Δh) bei der Rastersubtraktion

Datum	Höhendifferenz [mm]	
	Maximal negative Δh	Maximal positive Δh
21.11.2002	-72	141
06.03.2003	-91	129
20.05.2003	-113	87
06.10.2003	-114	130

Die TRD_{HD} für jedes Raster ergibt sich aus der jeweiligen Höhendifferenz und der Referenzdichte zu Versuchsbeginn nach Gleichung (6.6). Für den Messtermin zu Versuchsbeginn am 24.09.2002 kann für alle Raster nur eine einheitliche Referenzdichte ($TRD_{ref}=1,43 \text{ g/cm}^3$) angenommen werden, die mittels Stechzylinderproben bestimmt wurde.

$$TRD_{HD} = \frac{TRD_{ref} \cdot h_{ref}}{h_{ref} + \Delta h} \quad (6.6)$$

mit

TRD_{ref} TRD zu Versuchsbeginn [g/cm^3]

h_{ref} festgelegte Schichtdicke zu Versuchsbeginn [cm]

Δh Höhendifferenz [cm]

Die Ergebnisse der rasterweisen TRD_{HD} -Berechnung sind im Anhang I in den Abb. 10 bis 13 dargestellt. TRD_{HD} , die vorwiegend unterhalb der TRD_{ref} von $1,43 \text{ g}/\text{cm}^3$ lagen, wurden an den Messterminen am 21.11.2002 (s. Anhang I Abb. 10) und am 06.03.2003 (s. Anhang I Abb. 11) ermittelt. Höhere TRD_{HD} traten an den Messterminen am 20.05.2003 (s. Anhang I Abb. 12) und 06.10.2003 (s. Anhang I Abb. 13) auf.

Die in Abb. 6.2 dargestellten und in Tabelle 6.6 aufgeführten prozentualen Häufigkeiten der TRD_{HD} -Klassen an den verschiedenen Messterminen entsprechen plausiblen Werten. Die Klassen mit unrealistischen Werten für die TRD_{HD} von unter $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ und über $2 \text{ g}/\text{cm}^3$ treten mit einer Größenordnung von unter 1,5% auf. Diese Ausreißer sind wahrscheinlich messtechnisch bedingt, da zu Versuchsbeginn eine einheitliche Dichte für alle Raster angesetzt wird. Wenn auch einzelne Werte als Ausreißer identifiziert werden müssen, bietet die Klassifizierung eine gute Möglichkeit, die Variabilität der TRD_{HD} darzustellen. Am 21.11.2002 ist die Klasse mit einer TRD_{HD} von $>1,2$ bis $1,4 \text{ g}/\text{cm}^3$ am größten. Diese Klasse ist auch am 06.03.2003 am häufigsten vertreten, wird aber kleiner gegenüber dem 21.11.2002. Dagegen steigt die prozentuale Häufigkeit der Klasse mit einer TRD_{HD} von $>1,4$ bis $1,6$ an. Am 20.05.2003 und 06.10.2003 ist die Klasse mit einer TRD_{HD} von $>1,4$ bis $1,6$ am größten. Der Unterschied zwischen diesen beiden Terminen sind häufigere TRD_{HD} zwischen $>1,6$ bis $1,8 \text{ g}/\text{cm}^3$ am 20.05.2003 gegenüber dem 06.10.2003. Die Auflockerung des Bodens am Endtermin ist zudem an dem Anstieg der prozentualen Häufigkeit der Klasse mit einer TRD_{HD} von $>1,2$ bis $1,4 \text{ g}/\text{cm}^3$ ersichtlich. Die Auflockerung bzw. Verdichtung des Bodens lässt sich auch an der Zu- bzw. Abnahme der Größe der Klassen mit einer TRD_{HD} von $>1,0$ bis $1,2 \text{ g}/\text{cm}^3$ bzw. $>1,8$ bis $2,0 \text{ g}/\text{cm}^3$ ablesen. Mit 20% ist die Klasse mit einer TRD_{HD} von $>1,0$ bis $1,2 \text{ g}/\text{cm}^3$ am 21.11.2002 sehr groß, an dem der Boden nach dem Pflügen aufgelockert war. An dem Tag, als der Boden am stärksten verdichtet war, ist die Klasse $>1,8$ bis $2,0 \text{ g}/\text{cm}^3$ gegenüber den anderen Terminen am größten.

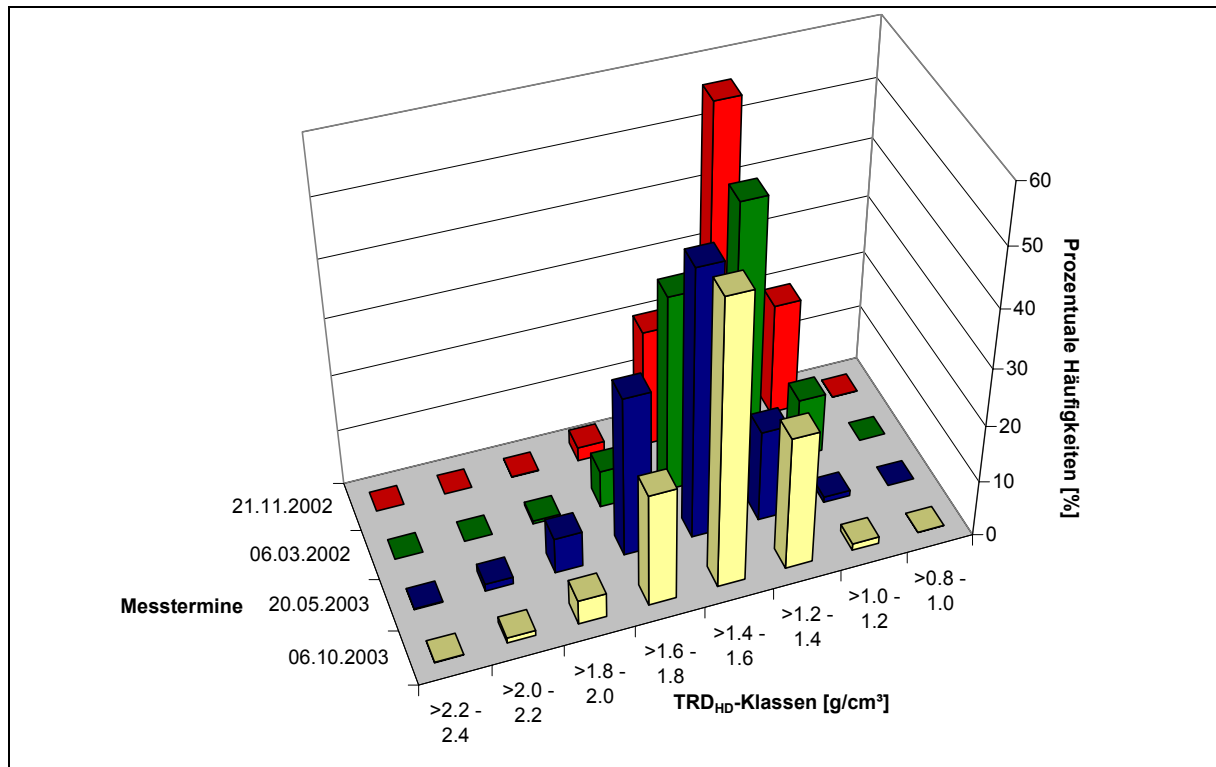


Abb. 6.2: Prozentuale Häufigkeiten der TRD_{HD}-Klassen an den verschiedenen Messterminen

Tabelle 6.6: Datentabelle der prozentualen Häufigkeiten der TRD_{HD}-Klassen

Messtermin	TRD _{HD} -Klassen [g/cm ³]							
	>0,8 - 1,0	>1,0 - 1,2	>1,2 - 1,4	>1,4 - 1,6	>1,6 - 1,8	>1,8 - 2,0	>2,0 - 2,2	>2,2 - 2,4
21.11.2002	0,05	19,91	56,79	20,76	2,42	0,07	0,00	0,00
06.03.2002	0,02	10,55	47,66	34,66	6,61	0,49	0,02	0,00
20.05.2003	0,00	0,97	16,12	46,96	28,21	6,30	1,27	0,16
06.10.2003	0,03	1,20	23,56	49,94	19,97	4,29	0,95	0,06

Um die Dichtebestimmung aus Höhendifferenzen mit der über das Profil gemittelten konventionellen Stechzylindermethode vergleichen zu können, müssen eine über die Fläche gemittelte TRD_{HD} und die mittlere Schichtdicke aller Raster gebildet werden. Dazu wurde die Grundgesamtheit der TRD_{HD} und Schichtdicken eines Messtermins mit dem *Kolmogorov-Smirnov*-Test auf Normalverteilung getestet mit dem Ergebnis für alle Messtermine $p < 0,01$. Für alle Messtermine konnte aufgrund der Normalverteilung ein arithmetisches Mittel für die TRD_{HD} und Schichtdicken gebildet werden, die in Tabelle 6.7 zusammengestellt sind.

Daneben wurde die Standardabweichung (σ) von der TRD_{HD} für alle Messtermine berechnet. Mit dem Ergebnis, dass die σ umso größer ist, je größer die mittlere TRD_{HD} ist.

Tabelle 6.7: Aus Scannermessungen ermittelte mittlere Schichtdicken und TRD_{HD} mit der zugehörigen Standardabweichung

Messtermin	Mittlere Schichtdicke [mm]	Mittlere TRD_{HD} [g/cm ³]	σ [g/cm ³]
24.09.2002	300 ⁺	1,43*	
21.11.2002	330	1,31**	0,13
06.03.2003	315	1,38**	0,14
20.05.2003	279	1,55**	0,17
01.10.2003	287	1,51**	0,16

⁺ Referenzschichtdicke

* Messung mit Stechzylinderproben (s. Kap. 3.3.2)

** Ermittlung aus Höhendifferenzen (s. Gleichung (6.6))

In Abb. 6.3 ist die Verteilungsstatistik der TRD_{HD} mit den Mittelwerten, den σ und den Quantilen 5/95% graphisch dargestellt.

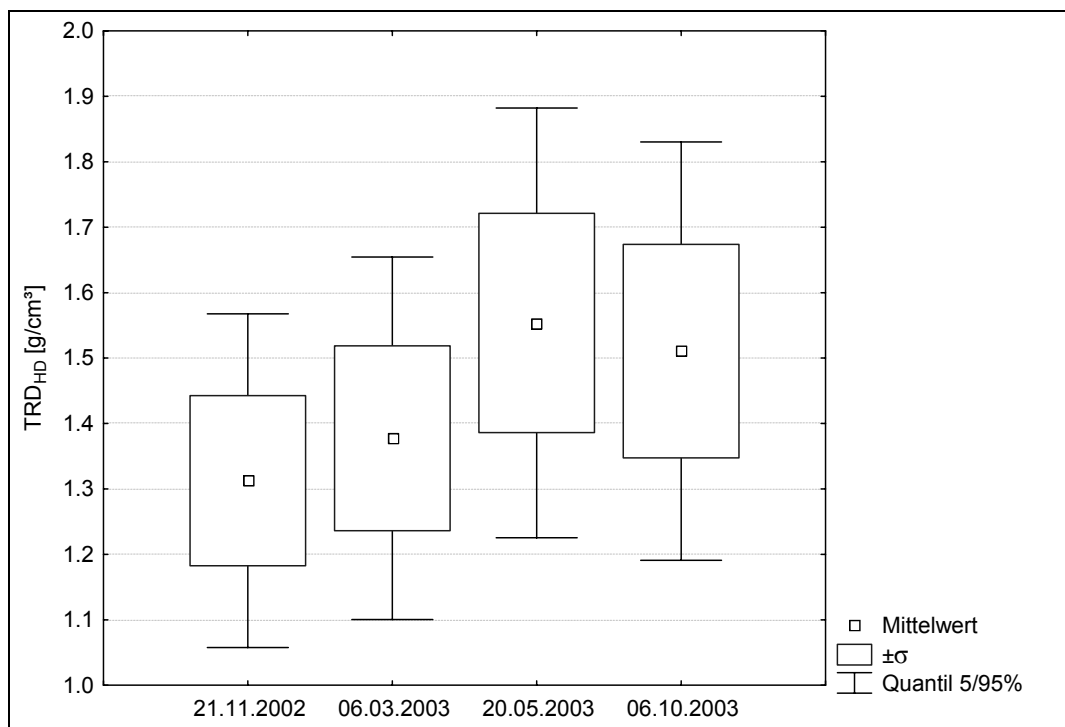


Abb. 6.3: Graphische Darstellung der Verteilungsstatistik der TRD_{HD}

In Tabelle 6.8 sind die über die Fläche gemittelten TRD_{HD} den über die Tiefe gemittelten TRD_{Stz} gegenübergestellt. Beim Vergleich der Werte lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Methoden feststellen. Der Korrelationskoeffizient zwischen

den mittleren TRD_{HD} ist mit $r = 0,995$ zu der linearen Regression der mittleren TRD_{Stz} etwas besser als zu der exponentialen Regression der mittleren TRD_{Stz} mit $r = 0,989$. Trotzdem kommt die exponentiale Regressionskurve der Realität näher, da mit zunehmender Tiefe die TRD nicht grenzenlos ansteigt und an der Oberfläche niedrige TRD vorherrschen.

Tabelle 6.8: Alle TRD im Vergleich

Termin	Scannermethode	Konventionelle Stechzylindermethode	
	\overline{TRD}_{HD} [g/cm ³] Höhendifferenz ⁺	\overline{TRD}_{Stz} [g/cm ³] Lineare Regression ⁺⁺	\overline{TRD}_{Stz} [g/cm ³] Exponentiale Regression ⁺⁺
24.09.2002		1,43	1,43
21.11.2002	1,31	1,33	1,32
06.03.2003	1,38	1,37	1,36
20.05.2003	1,55	1,54	1,52
06.10.2003	1,51	1,51	1,51

⁺ Mittelwertbildung über die Gesamtfläche

⁺⁺ Mittelwertbildung über die Tiefe

In Tabelle 6.9 sind die berechneten Schichtdicken aller Methoden gegenübergestellt. Die Abweichungen zwischen den Methoden betragen nie mehr als 7 mm. Die nach einem Jahr ermittelte Schichtdicke am 01.10.2003 unterscheidet sich von der Ausgangsschichtdicke von 300 mm am 24.09.2002 aufgrund der unterschiedlichen Bodenbearbeitungsmaßnahmen zu den verschiedenen Fruchtarten und zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Im Jahr 2002 wurde Winterweizen angebaut und im Jahr 2003 Zuckerrüben. Im Gegensatz zum Winterweizen wurde bei der Aussaat der Zuckerrüben das Feld gewalzt, was zu einer zusätzlichen Verdichtung des Bodens führte.

Tabelle 6.9: Alle mittlere Schichtdicken im Vergleich

Termin	Mittlere Schichtdicke Höhendifferenz [mm]	Mittlere Schichtdicke Lineare Regression [mm]	Mittlere Schichtdicke Exponentiale Regression [mm]
24.09.2002	300 ⁺	300 ⁺	300 ⁺
21.11.2002	330	323	325
06.03.2003	315	313	315
20.05.2003	279	279	282
06.10.2003	287	284	284

⁺ Referenzschichtdicke

6.2.2 Verteilung der Trockenrohdichte aus Höhendifferenzen im Bodenprofil

Da bei der Dichtebestimmungsmethode über Höhendifferenzen keine Verteilung der TRD_{HD} im Bodenprofil angegeben werden kann, sollen Messungen des Eindringwiderstandes (R_E) (s. Kap. 3.3.3) im Bodenprofil von 0 bis 35 cm dazu dienen, eine Verteilung abzuleiten. Die Messungen des R_E wurden parallel zu den Scanneraufnahmen durchgeführt. Die Messergebnisse sind in Abb. 6.4 dargestellt.

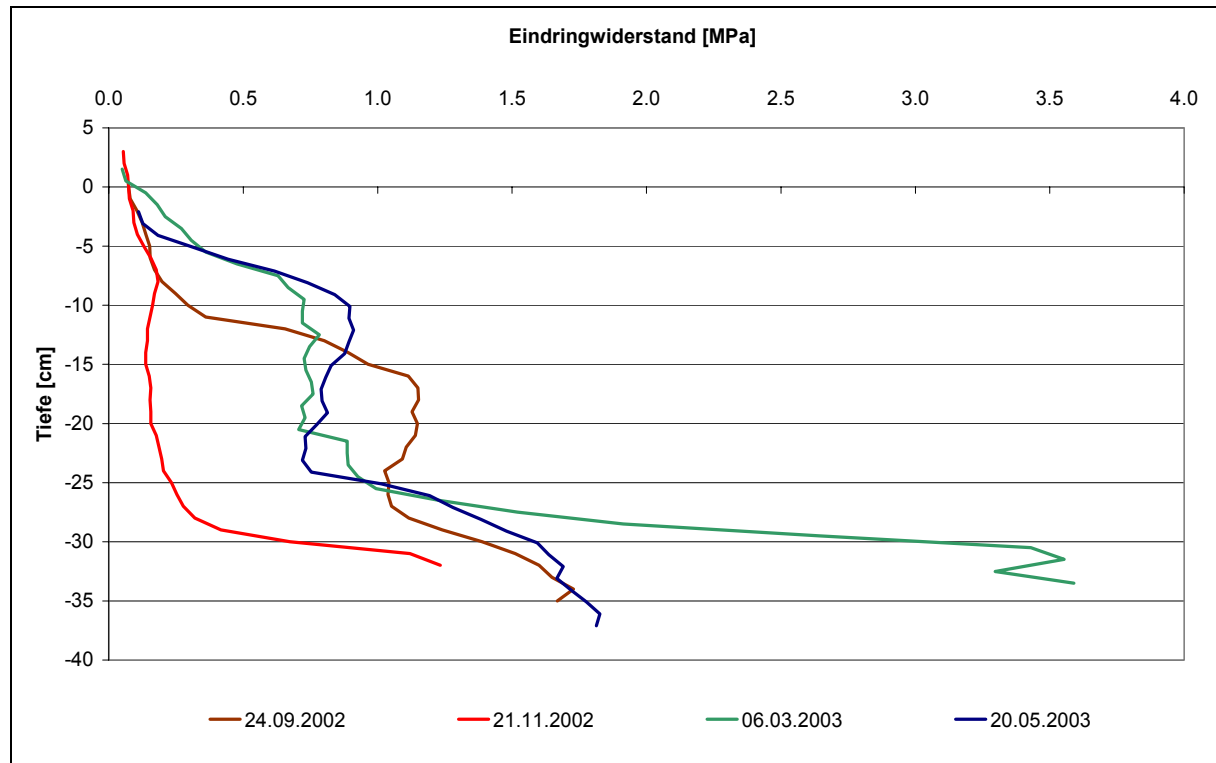


Abb. 6.4: Eindringwiderstandsmessungen dargestellt mit angepasster Tiefe nach Tabelle 6.7

Die Anfangswerte des R_E wurden je nach Verschiebung der Bodenoberfläche in Bezug zum Ausgangstermin am 24.09.2002 durch Differenzbildung der Schichtdicken, die aus den Höhendifferenzen mittels Scannermessungen ermittelt wurden, nach Tabelle 6.9 versetzt. Das bedeutet, am 21.11.2002 wurde der Anfangswert um 30 mm nach oben, am 06.03.2003 um 15 mm nach oben und am 20.05.2003 um 21 mm nach unten verschoben. Am 06.10.2003 konnte wegen Batterieausfall keine Messung durchgeführt werden. Der Abb. 6.4 ist zu entnehmen, dass am 24.09.2002 eine starke Bodenverdichtung unterhalb von -10 cm auftrat. Im oberen Bereich wurde ein relativ geringer R_E gemessen, was auf die Auflockerung des Bodens durch Bioturbation der Anbaufrucht vor der Ernte zurückzuführen ist.

Am 21.11.2002, dem Messtermin nach der Pflugbearbeitung, wurde von 5 bis -28 cm ein geringer R_E gemessen. Nach der Winterperiode wurden am 06.03.2003 deutlich höhere R_E gemessen. Der Boden hat sich besonders im unteren Bereich gesetzt. Die Messung vom 20.05.2003 zeigt eine Erhöhung des R_E im Bereich zwischen -10 und -20cm gegenüber dem 06.03.2003.

Die Messungen des R_E wurden benutzt, um eine Formel zur Verteilung der mittleren TRD_{HD} aus Tabelle 6.7 im Bodenprofil zu entwickeln. Unter der Hypothese, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der TRD_{HD} und dem R_E besteht und unter Annahme einer konstanten Θ in der Bodenschicht, kann man die Gleichung (6.7) aufstellen.

$$TRD_{HD}(h) = a + b \cdot R_E(h) \quad (6.7)$$

Der Anstieg b der linearen Gleichung (6.7) ergibt sich (s. Abb. 6.5) aus der Differenz der Änderung der TRD_{HD} und der Änderung des R_E . Daraus folgt die Gleichung (6.8).

$$b = \frac{\overline{TRD_{HD}}(30) - \overline{TRD_{HD}}(5)}{\overline{R_E}(30) - \overline{R_E}(5)} \quad (6.8)$$

mit

$\overline{TRD_{HD}}(30)$ Mittlere Trockenrohdichte von 0 bis 30 cm

$\overline{TRD_{HD}}(5)$ Mittlere Trockenrohdichte von 0 bis 5 cm (Messung mit Stechzylindern)

$\overline{R_E}(30)$ Mittlerer Eindringwiderstand von 0 bis 30 cm

$\overline{R_E}(5)$ Mittlerer Eindringwiderstand von 0 bis 5 cm

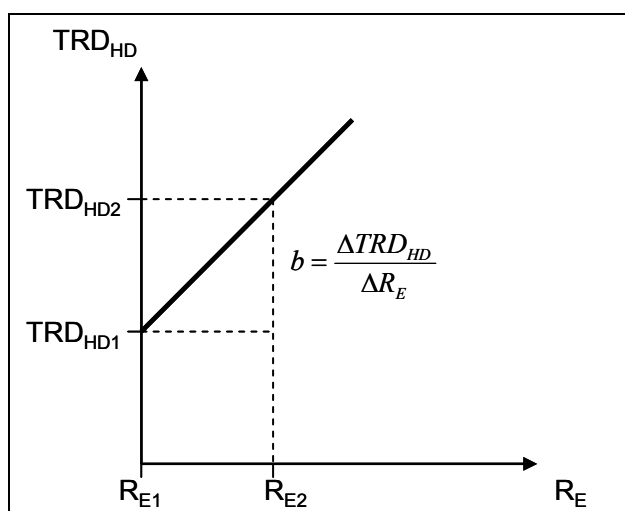


Abb. 6.5: Angenommener linearer Zusammenhang zwischen TRD_{HD} und R_E

Beim Einsetzen von Gleichung (6.8) in die Gleichung (6.7) folgt:

$$TRD(h) = a + \frac{\overline{TRD}_{HD}(30) - \overline{TRD}_{SIZ}(5)}{\overline{R}_E(30) - \overline{R}_E(5)} \cdot R_E(h) \quad (6.9)$$

mit den bekannten Fixpunkten

$$P_1(\overline{R}_E(5); \overline{TRD}_{SIZ}(5)) \text{ und } P_2(\overline{R}_E(30); \overline{TRD}_{HD}(30))$$

Durch das Einsetzen des bekannten Fixpunktes P_1 in Gleichung (6.9) ergibt sich Gleichung (6.10).

$$\overline{TRD}_{SIZ}(5) = a + \frac{\overline{TRD}_{HD}(30) - \overline{TRD}_{SIZ}(5)}{\overline{R}_E(30) - \overline{R}_E(5)} \cdot \overline{R}_E(5) \quad (6.10)$$

Aus Gleichung (6.10) aufgelöst nach a folgt Gleichung (6.11).

$$a = \overline{TRD}_{SIZ}(5) - \frac{\overline{TRD}_{HD}(30) - \overline{TRD}_{SIZ}(5)}{\overline{R}_E(30) - \overline{R}_E(5)} \cdot \overline{R}_E(5) \quad (6.11)$$

Mit bekannten b aus Gleichung (6.8) und a aus Gleichung (6.11) für die Gleichung (6.7) erhält man die Gleichung (6.12), mit der man für jedes beliebige h in der Bodenschicht von 0 bis 30 cm die TRD_{HD} berechnen kann.

$$\overline{TRD}_{HD}(h) = \frac{\overline{TRD}_{HD}(30) - \overline{TRD}_{SIZ}(5)}{\overline{R}_E(30) - \overline{R}_E(5)} \cdot (R_E(h) - \overline{R}_E(5)) + \overline{TRD}_{SIZ}(5) \quad (6.12)$$

Voraussetzung für die Verteilung der Dichte im Bodenprofil ist die Kenntnis der TRD im Bereich von 0 bis 5 cm ($\overline{TRD}_{SIZ}(5)$). Damit wird eine Begrenzung der Schwankungsbreite der TRD um die Trendlinie durch die Fixpunkte P_1 und P_2 erreicht. Ohne diese Begrenzung würde die Dichte trotz Einhaltung der Mittelwertvorgabe über das Profil unrealistische Werte von 0,5 bis 3 g/cm³ annehmen. Da diese Erkenntnis erst mit Auswertung der Daten erlangt wurde, sind keine Stechzylinder in der Höhe von 0 bis 5 cm entnommen wurden. Um die

\overline{TRD}_{SIZ} (5) als Wert verwenden zu können, erfolgte die Berechnung nach Gleichung (6.4) mittels der Stechzylinderproben, die in 5, 15 und 25 cm Tiefe entnommen wurden. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 6.10 aufgeführt.

Tabelle 6.10: Nach Gleichung (6.4) berechnete TRD_{SIZ} zwischen 0-5 cm

Termin	\overline{TRD}_{SIZ} 0-5cm [g/cm ³]
24.09.2002	1,32
22.11.2002	1,22
06.03.2003	1,18
20.05.2003	1,50
01.10.2003	1,46

Die in Abb. 6.6 dargestellte Verteilung der mittleren TRD_{HD} , die nach Gleichung (6.12) und unter Verwendung der mittleren TRD_{HD} aus Tabelle 6.7 und TRD_{SIZ} zwischen 0-5 cm aus Tabelle 6.10 ermittelt wurde, ist eine mögliche Variante, die allerdings den Einfluss der Bodenfeuchte auf den R_E nicht berücksichtigt. Dazu müssten gleichzeitig zur Messung des Eindringwiderstandes Profilmessungen der Bodenfeuchte mit Sonden durchgeführt werden.

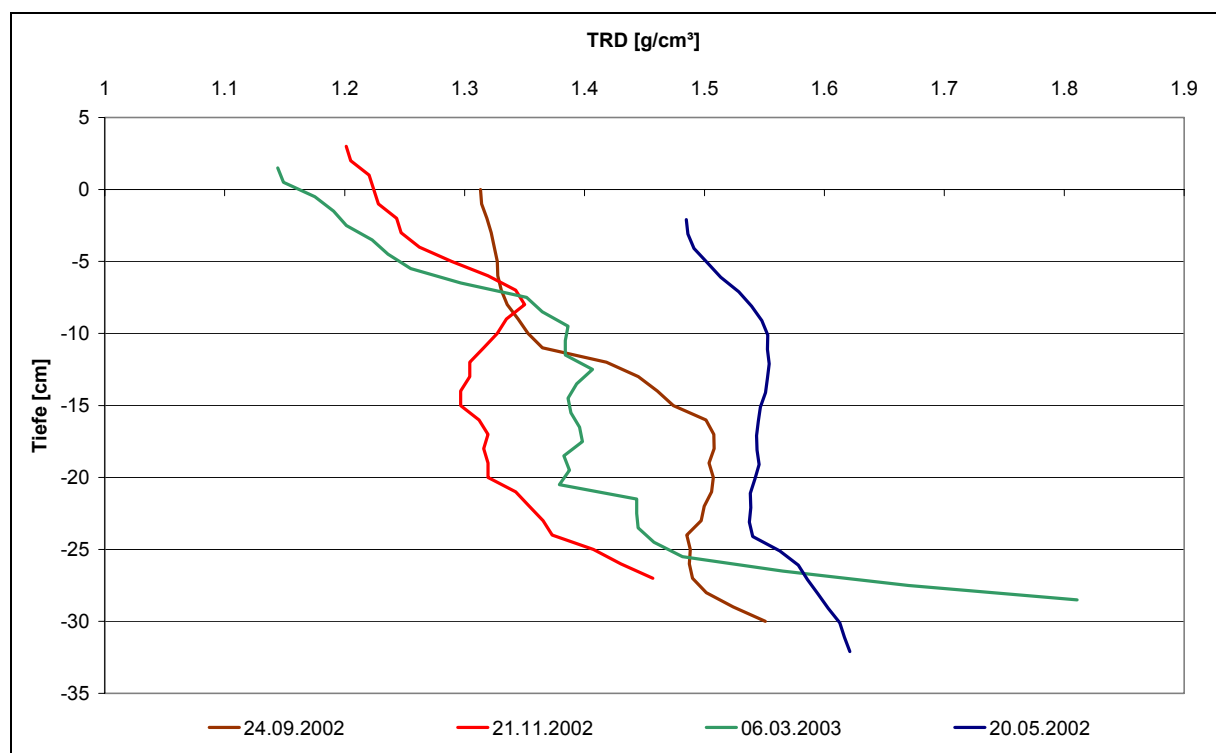


Abb. 6.6: Verteilung der mittleren TRD_{HD} im Bodenprofil mittels R_E nach Gleichung (6.12)

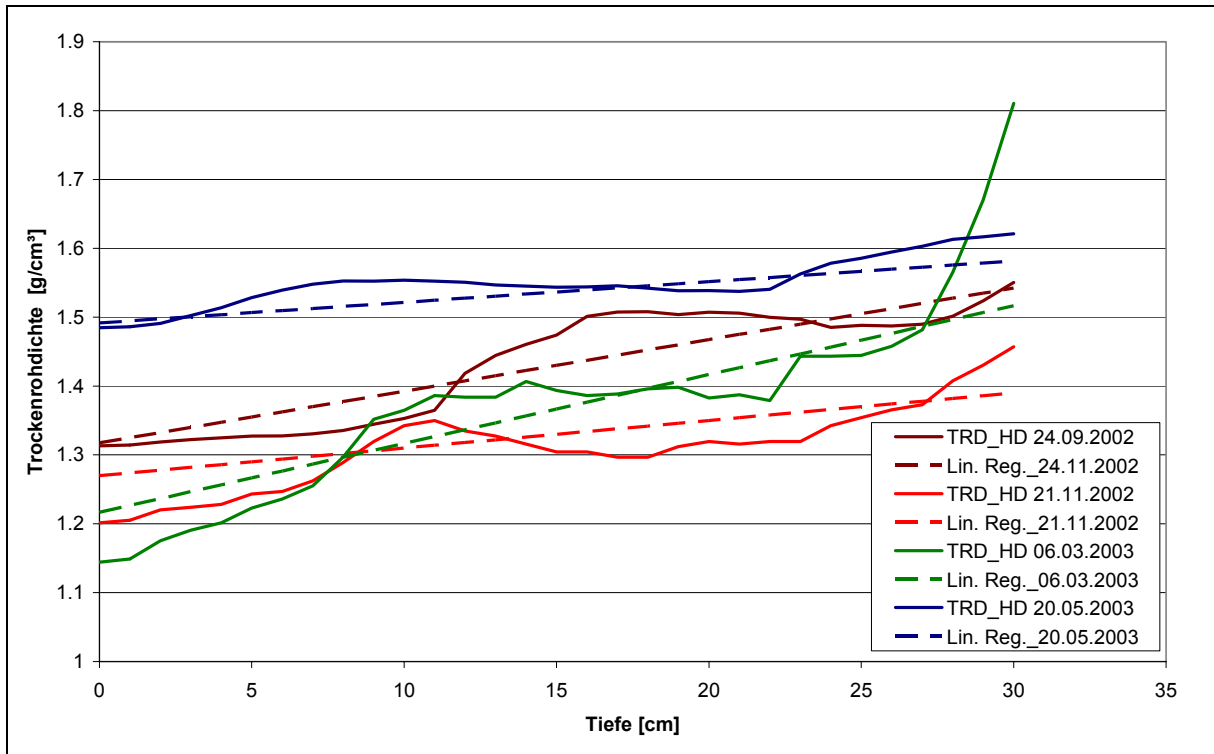


Abb. 6.7: Gegenüberstellung der TRD_{HD}-Verteilung im Bodenprofil mit der Verteilung der TRD_{StZ} nach linearer Regression

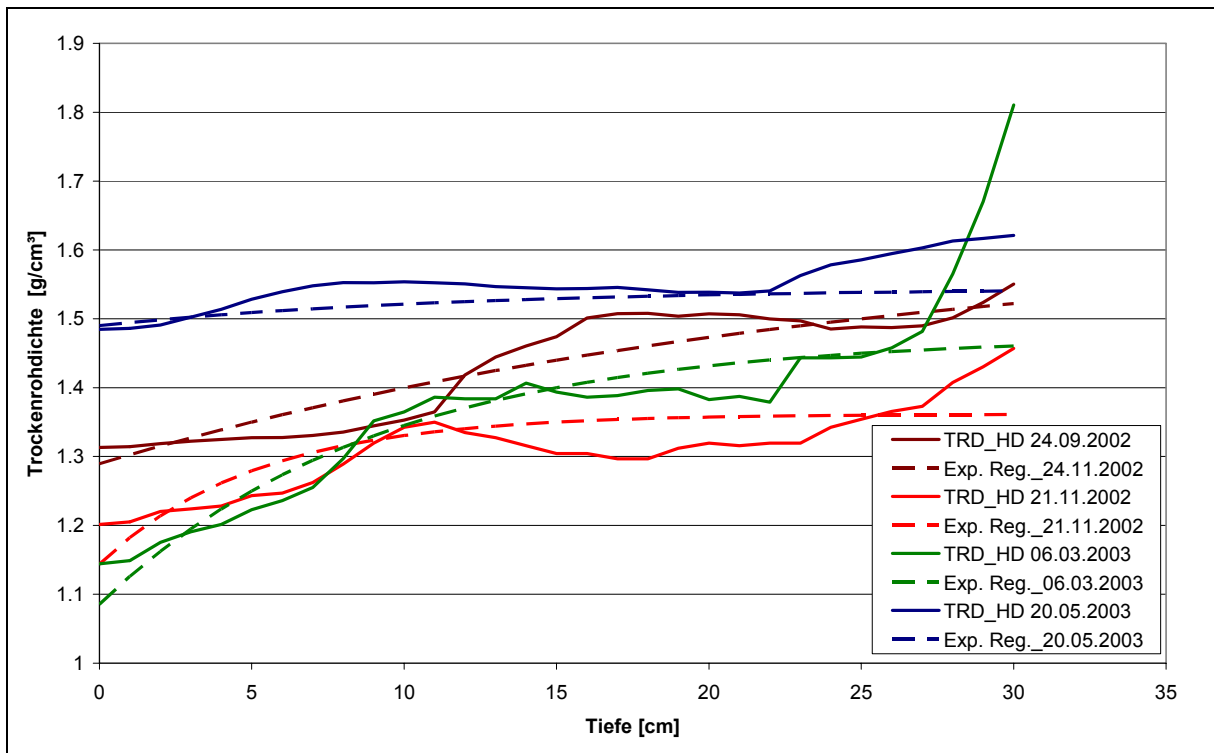


Abb. 6.8: Gegenüberstellung der TRD_{HD}-Verteilung im Bodenprofil mit der Verteilung der TRD_{StZ} nach exponentieller Regression

Eine Gegenüberstellung der TRD_{HD}-Verteilung im Bodenprofil mit der Verteilung der TRD_{SIZ} nach linearer Regression in Abb. 6.7 und nach exponentieller Regression in Abb. 6.8 kann nicht als Gütemaß für eine Methode verwendet werden. Die Vergleiche genügen jedoch als Indikator, um die Verwendbarkeit der Methode zu testen, die mittlere Dichte aus Höhendifferenzen mittels Eindringwiderstandmessungen im Profil zu verteilen. Beide Gegenüberstellungen zeigen, dass die Verteilungsfunktion der TRD_{HD} mit R_E-Messungen im plausiblen Wertebereich liegt. Das Fehlen von Bodenfeuchtemesswerten im Profil verhindert jedoch die Interpretation der stufenartigen Zu- und Abnahme der TRD_{HD}.

6.3 Sensitivität der Dichte auf das Umsatzverhalten der organischen Substanz

Die Anwendung des CIPS-Modells erfolgte, um die Wirkung der schwankenden TRD_{HD} auf die Dynamik des Kohlenstoffs im Boden darzustellen.

Eine unterschiedliche TRD bedingt eine Änderung weiterer Bodenparameter, die als Inputdaten für die Simulation der Kohlenstoffdynamik benötigt werden. Die Feldkapazität (FK) und der Permanente Welkepunkt (PWP) bei einer bestimmten TRD wurden mit der Pedotransferfunktion (6.14) nach RAWLS und BRAKENSIEK (1985) mit den *Brooks-Corey* Parametern (s. Anhang J) ermittelt. Zur Anwendung der Pedotransferfunktion erfolgte die Umrechnung der deutschen Texturklassen in das USDA7-System mit der Gleichung (6.13) (NEMES et al., 1999). Die Ergebnisse der Texturklassenumrechnung sind in Tabelle 6.11 zusammengestellt.

$$TKG = (y_2 - y_1) / (\log(x_2) - \log(x_1)) \cdot \log(x) - (y_2 - y_1) / (\log(x_2) - \log(x_1)) \cdot \log(x_1) + y_1 \quad (6.13)$$

mit

TKG	Texturklassengröße [Masse%]
x	Partikelgrößendurchmesser der zu interpolieren ist (obere Grenze)
x ₁ , x ₂	Zu y ₁ und y ₂ korrespondierende Partikelgrößendurchmesser
y ₁	Summenprozent der Klasse mit nächst kleinerem Durchmesser
y ₂	Summenprozent der Klasse mit nächst größerem Durchmesser

Tabelle 6.11: Texturklassenumrechnung vom deutschen in das USDA7 System für den Boden des „Statischen Dauerdüngungsversuches“ Bad Lauchstädt

Bezeichnung	Durchmesser [mm]	Anteil Summen [%]	Bezeichnung USDA7	Durchmesser	Anteil
				USDA7 [mm]	USDA7 Summen [%]
Ton	<0,002	21,0	Ton	<0,002	21,0
Feinschluff	0,002-0,0063	28,0	Schluff	0,002-0,05	79,8
Mittelschluff	0,0063-0,02	44,0	sehr feiner Sand	0,05-0,1	92,2
Grobschluff	0,02-0,063	88,8	Feinsand	0,1-0,25	97,8
Feinsand	0,063-0,2	97,4	Mittelsand	0,25-0,5	99,1
Mittelsand	0,2-0,63	99,5	Grobsand	0,5-1	99,7
Grobsand	0,63-2	100,0	sehr grober Sand	1-2	100,0

Die Berechnung der FK erfolgte mit einem Matrixpotential von $\Psi=180$ hPa und des PWP mit $\Psi=15000$ hPa mit der Pedotransferfunktion (6.14). Das Matrixpotential von $\Psi=180$ hPa entspricht einem pF-Wert von ca. 2,3. Dieser wurde aufgrund der standörtlichen Gegebenheiten in Bad Lauchstädt gewählt und um eine plausible Spannbreite der FK abzubilden (s. Tabelle 6.12).

$$\Theta(\Psi) = \begin{cases} \Theta_r + (\Theta_s - \Theta_r) \cdot \left(\frac{\Psi}{\Psi_b} \right)^{-\lambda} & \text{für } \Psi > \Psi_b > \lambda > 0 \\ \Theta_s & \Psi \leq \Psi_b \end{cases} \quad (6.14)$$

mit den Brooks-Corey Parametern:

$\Theta(\Psi)$ Wassergehalt [Vol.%] als Funktion des Matrixpotentials

Ψ Matrixpotential [hPa]

Ψ_b Lufteintrittspunkt [hPa]

Θ_r residualer Wassergehalt [Vol.%]

Θ_s Sättigungswassergehalt [Vol%]

λ Porengrößenindex

Die Berechnung der Brooks-Corey Parameter ist im Anhang J aufgeführt.

Das Porenvolumen (PV) ergibt sich aus der jeweiligen TRD und TSD von $2,56 \text{ g/cm}^3$ (s. Anhang B – Tabelle 1).

Die zu den verschiedenen TRD ermittelten Bodenparameter sind in Tabelle 6.12 aufgeführt. Der PWP bleibt bei allen TRD konstant. FK und PV steigen mit abnehmender TRD_{HD}.

Tabelle 6.12: Mittels Pedotransferfunktionen ermittelte PWP, FK und Porenvolumina (PV) bei experimentell bestimmter unterschiedlicher Trockenrohdichte (TRD_{HD})

Messtermin	TRD _{HD} * [g/cm ³]	PWP ⁺ [Vol%]	FK ⁺ [Vol%]	PV ⁺⁺ [Vol%]
24.09.2002	1,43**	13	29	44
21.11.2002	1,31	13	31	49
06.03.2003	1,38	13	30	46
20.05.2003	1,55	13	28	39
06.10.2003	1,51	13	28	41

⁺ nach RAWLS und BRAKENSIEK (1985)

⁺⁺ nach LIEBEROTH (1982)

* Mittelwert von TRD aus Höhendifferenzen

** Messung mit Stechzylinderproben (s. Kap. 3.3.2)

Zur Simulation mit dem CIPS-Modell wurden Extremwerte der TRD und die TRD vom Referenztermin (24.09.2002) gewählt.

Die Bodenparameter PWP, FK und PV aus Tabelle 6.12 dienen zur Berechnung der initialen Bedingungen des CIPS-Modells. Nach Kap. 4.3 ergibt sich die in Tabelle 6.13 aufgelistete Verteilung des Gesamtkohlenstoffs (C_{org}) zu Simulationsbeginn auf die einzelnen Porenklassen.

Tabelle 6.13: Verteilung des Gesamtkohlenstoffs zu Simulationsbeginn (C_{org}=1,8%) auf die Mikro- (mic), Meso- (mes) und Makroporen (mac) nach der Porenoberfläche (POF)

Messtermin	POF _{mic} [km ² /m ³]	Corg _{mic} [%]	POF _{mes} [km ² /m ³]	Corg _{mes} [%]	POF _{mac} [km ² /m ³]	Corg _{mac} [%]
24.09.2002	5,2	1,1063	3,2	0,6809	0,060	0,0128
21.11.2002	5,2	1,0550	3,6	0,7304	0,072	0,0146
20.05.2003	5,2	1,1354	3,0	0,6550	0,044	0,0096

Die POF_{mic} ist aufgrund des konstanten PWP-Wertes bei allen Terminen gleich groß. Jedoch aufgrund der geringeren Gesamtporenoberfläche bei höherer TRD (20.05.2003) wird den Mikroporen ein höherer Anteil am C_{org} zugeteilt. Da in den Mikroporen aufgrund der meist schlechten Umsatzbedingungen für Kohlenstoff ein Stabilisierungsprozess zu verzeichnen ist, wird bei höherer TRD mehr Kohlenstoff vom Umsatzprozess ausgeschlossen.

Eine geringere Dichte führt zu einer größeren Porenoberfläche der Meso- und Makroporen und damit der Gesamtporenoberfläche. Bei Verteilung der gleichen Menge an C_{org} nach dem Anteil der Porenoberfläche einer Porenklasse fällt bei gleichzeitig abnehmendem Gehalt an Kohlenstoff in den Mikroporen ein größerer Anteil an Kohlenstoff den Meso- und Makroporen zu. Der Umsatzprozess findet dadurch schneller statt.

Die globale Biologisch Aktive Zeit (BAT_{glob}) umfasst den Zeitraum optimaler Umsatzbedingungen eines Versuchsjahres. Unter Verwendung der in Tabelle 6.12 berechneten Bodenparameter wurden für die drei Termine Bodenprofile (s. Anhang K) erstellt, um die BAT-Berechnung und deren Aufteilung auf die Porenklassen mit dem CANDY-Modell (s. Kap. 2.3) durchführen zu können. Die Ergebnisse der BAT-Verteilung sind in Tabelle 6.14 aufgeführt.

Tabelle 6.14: Verteilung der mit dem CANDY-Modell simulierten BAT_{glob} auf die Mikro- (mic), Meso- (mes) und Makroporen (mac)

Messtermin	BAT_{glob}^* [d/a]	Anteil		Anteil		Anteil	
		BAT_{mic} [d/a]	BAT_{mic} %	BAT_{mes} [d/a]	BAT_{mes} [%]	BAT_{mac} [d/a]	BAT_{mac} [%]
24.09.2002	24	1,1	5	15,2	64	7,3	31
21.11.2002	30	0,8	3	16,3	54	13,2	43
20.05.2003	17	1,1	7	13,0	76	2,8	17

* gerundet

Die Simulationen mit dem CIPS-Modell wurden für die Volldüngungsvariante des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt mit einem jährlichen C-Input von $155\mu\text{gC/gBoden}$ aus Ernte- und Wurzelrückständen und $667\mu\text{gC/gBoden}$ C-Input aller 2 Jahre aus organischen Düngern durchgeführt.

Der Anfangskohlenstoffgehalt von $1,8\% C_{org}$ wurde nach 100 a bei einer $TRD=1,31\text{ g/cm}^3$ um $33\% C_{org}$, bei einer $TRD=1,43\text{ g/cm}^3$ um $39\% C_{org}$ und bei einer $TRD=1,55\text{ g/cm}^3$ um $44\% C_{org}$ erhöht (s. Abb. 6.9). Das heißt, es wird bei höherer TRD deutlich mehr C_{org} im Boden akkumuliert.

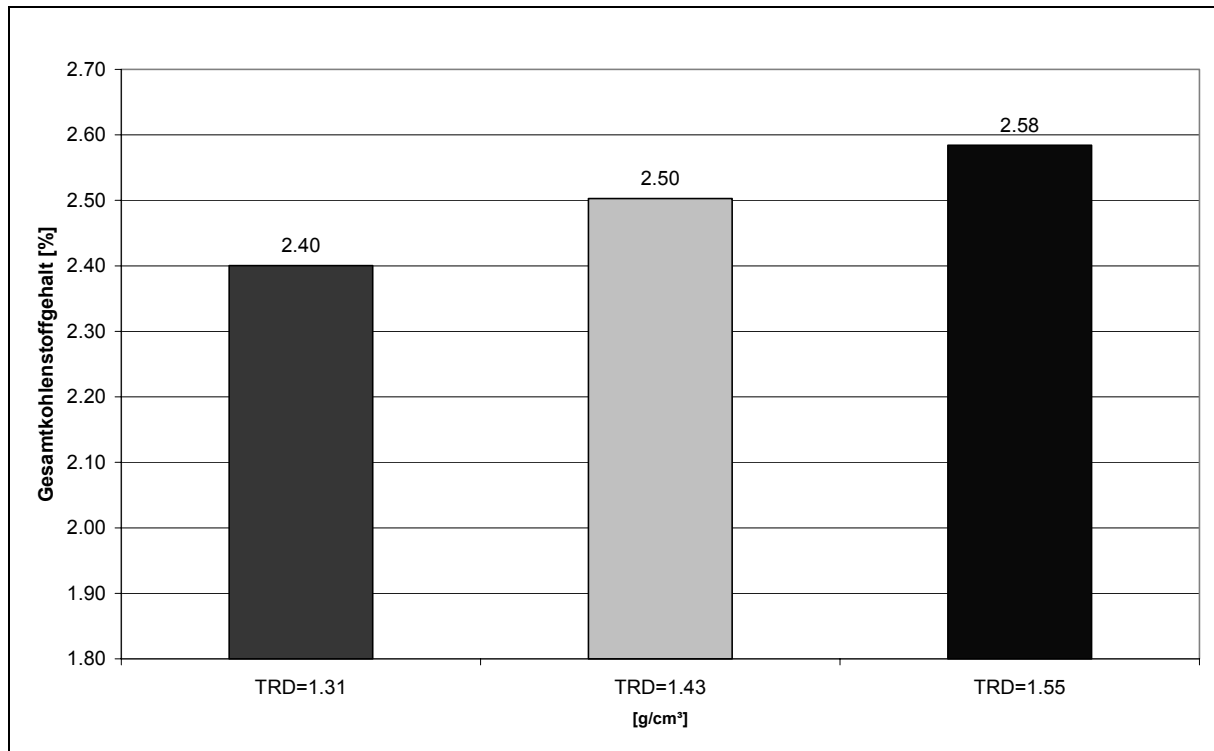


Abb. 6.9: Änderung des Gesamtkohlenstoffgehaltes im Volldüngungsplot des „Statischen Düngungsversuches“ Bad Lauchstädt nach 100 a bei Annahme unterschiedlicher TRD bei einem Anfangskohlenstoffgehalt von 1,8%